

Calidad de los mapas de distribución espacial de fósforo y sus efectos en la recomendación de dosis variable de fertilización

Kemerer, Alejandra; Melchiori, Ricardo

EEA INTA Paraná Ruta 11 Km 12,5
{kemerer.alejandra, melchiori.ricardo}@inta.gob.ar

Abstract. El objetivo fue determinar el efecto de la calidad de los mapas de variabilidad espacial de fósforo en el suelo (P) sobre la comparación de prescripciones de fertilización fija vs variable. Se determinó el contenido de P en el suelo mediante dos muestreos: i- en grilla regular a 60 x 60 m, y ii- una muestra compuesta al azar. El P fue mapeado utilizando kriging aplicando un procedimiento de optimización en la selección de propiedades geoestadísticas y de interpolación. Los valores de P presentaron una alta variabilidad y difirieron en sus propiedades geoestadísticas entre lotes. La calidad de los mapas se evaluó a través de la Eficiencia de Predicción (EP). Se propone calcular la EP utilizando como referencia el valor obtenido por el muestreo al azar (EPp) en lugar del valor promedio de la grilla de datos (EPg). Los valores de EPp fueron mayores en todos los casos a EPg. La variabilidad de los valores de P respecto al nivel crítico y la EP determinaron diferencias en la dosis de P recomendada. La prescripción sitio específica de P evidenció una mejor performance que la dosis fija considerando áreas sub- y sobre-fertilizadas.

Keywords: eficiencia de predicción, calidad de mapas de suelo, manejo sitioespecífico

1 Introducción

El manejo sitio específico de nutrientes fue propuesto como método para ajustar la dosis de fertilizante según la variabilidad espacial en la disponibilidad de nutrientes en el suelo y las necesidades de los cultivos [1], optimizando el uso de insumos, minimizando el impacto ambiental y contribuyendo a la sustentabilidad [2].

Si bien en Argentina se ha observado en los últimos años un incremento en el volumen de ventas de equipos y maquinarias de agricultura de precisión [3], el manejo sitio específico de nutrientes aún no evidencia un grado elevado de adopción. Una de las causas mencionadas por los usuarios para la falta de adopción es que no se ha demostrado claramente el beneficio económico respecto al manejo uniforme tradicional [4].

La fertilización sitio-específica ha sido muy estudiada y se ha demostrado que la intensidad y estrategia de muestreo es sitio y nutriente específica [5], [6], [7]. Sin

embargo, la calidad de los mapas utilizados para guiar la fertilización sitio-específica ha sido poco evaluada [7], [8].

La eficiencia de predicción (EP) [9] se ha utilizado para comparar la eficiencia con que un mapa interpolado representa los datos observados, respecto a la utilización del valor medio de los datos de una grilla [10], [11]. Este método requiere el valor medio de un muestreo en grilla, información que no está disponible a priori. Para analizar el beneficio del manejo sitio específico respecto al uniforme proponemos evaluar la eficiencia del mapa interpolado respecto al valor obtenido mediante un muestreo de suelo convencional como el que realiza el productor.

En Argentina no existen trabajos sobre manejo sitio específico de P, y los antecedentes sobre variabilidad espacial se han enfocado en estudios a escala regional [12], [13], [14]. Mejorar el manejo del P en Argentina resulta clave debido a que las dosis de fertilizante fosforado son bajas y se ha observado una disminución importante en la disponibilidad de fósforo en el suelo en la región pampeana [14]. Generar información sobre alternativas de fertilización y comparaciones entre dosis fijas y variables podrían promover la adopción del manejo sitio específico del P por parte de los productores y contribuir a mejorar la eficiencia de uso del P.

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la calidad de los mapas de variabilidad espacial de P en la comparación de prescripciones de fertilización fija vs variable.

2 Materiales y Métodos

El trabajo se realizó en tres lotes agrícolas de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA ($31^{\circ} 50' S$, $61^{\circ} 31' W$) con superficies de 10, 12 y 16 has. Los suelos están mapeados a una escala 1:5000 y los principales tipos presentes corresponden a Argiudoles ácuicos, Argiudoles vérticos, Argiudoles oxiácuicos, Hapludoles oxiácuicos, Hapludoles petrocálcicos y Hapludertes típicos [15] (Figura 1).

En cada uno de los sitios se realizaron dos tipos de muestreos: i- mediante una grilla regular a 60×60 m, y ii- mediante un muestreo como tradicionalmente utilizan los productores obteniendo una muestra compuesta por 30 piques al azar. En todos los casos la profundidad de muestreo fue de 20 cm. Los puntos de las grillas fueron georeferenciados y en un radio de 2 metros alrededor de cada uno de ellos se extrajeron entre 10 y 15 submuestras utilizando un calador de 2 cm de diámetro. Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas con un tamiz de 2 mm y se determinó el contenido de fósforo disponible mediante el test de Bray 1 [16].

Se calcularon los estadísticos descriptivos para cada variable y los valores que excedieron 2 desvíos estándar del valor de la media fueron eliminados para reducir la influencia de valores extremos. Se determinó la normalidad de la distribución de los datos utilizando el programa INFOSTAT v2008 [17] y las distribuciones no-normales fueron transformadas por logaritmo natural. Los análisis geoestadísticos incluyeron el cálculo de semivariogramas experimentales, la selección de modelos de semivariogramas teóricos y la interpolación por kriging puntual a una grilla de 15×30 m, utilizando el programa GS+ v9.0 [18]. Se utilizó un procedimiento iterativo para optimi-

zar el mapeo del contenido de P, que incluyó la selección conjunta de modelo de semivariograma, distancia lag, número de vecinos y radio de entorno de vecinos en una distancia activa del 60%. Los modelos de semivariograma evaluados fueron esférico, exponencial, Gausiano y lineal. Las distancias lag evaluadas fueron 60 y 75 m, el número de vecinos 4, 8 y 12, y los radios de entorno de 100, 150 y 200 m. El criterio de selección del procedimiento fue el que maximizó la relación observado vs estimado por validación cruzada, como realizaron [5] y se determinó el grado de dependencia espacial según [19].

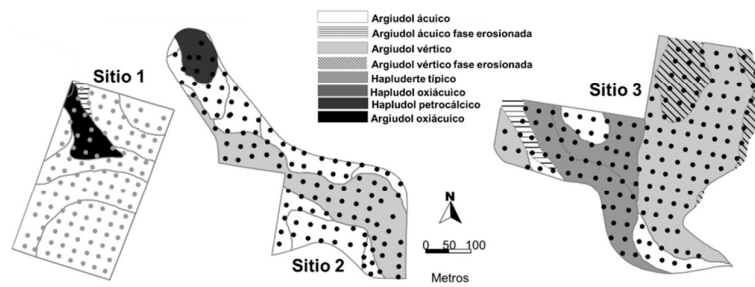


Fig. 1. Suelos presentes en los sitios evaluados y localización de los puntos de la grilla de muestreo a 60 x 60 m.

La calidad de los mapas se determinó mediante la Eficiencia de Predicción (1), utilizando dos aproximaciones (EPg) y (EPp)

$$EP\% = 100 \times \frac{(ECM_{promedio_lote} - ECM)}{ECM_{promedio_lote}} \quad (1)$$

Dónde

$$ECM_{promedio_lote} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$ECM = \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2, \quad \hat{x}_i \text{ es el valor estimado en el mapa} \quad (3)$$

La EPg se calculó utilizando el promedio de los datos de cada grilla como \bar{x} , considerando este valor como el más cercano a la media de la población, y la EPp se calculó utilizando el valor del muestreo al azar del productor como \bar{x} . Valores positivos de EP indican que el mapa interpolado predice mejor los valores observados que el valor promedio de la grilla (EPg positivo) o que el valor obtenido en el muestreo del productor (EPp positivo).

Los valores de P disponible del muestreo al azar del productor y de los mapas interpolados fueron utilizados para calcular y comparar la prescripción de dosis de fertilizante fija vs sitio-específica. La comparación entre la dosis fija y dosis por sitio-

específico se realizó definiendo celdas de aplicación de 15 x 30 m (Figura 2). El tamaño de la celda se definió considerando el ancho de trabajo de una fertilizadora y un retardo normal para el cambio de dosis durante la aplicación. La dosis fija se calculó utilizando el valor de P disponible determinado en el muestreo al azar del productor para cada lote. El mapa de prescripción variable para la fertilización sitio-específica se determinó utilizando los valores de P del mapa interpolado.

La dosis de P se calculó considerando un nivel crítico 20 ppm según (4)

$$P_{fertilizante} = (P_i - NC) \times DE \quad (4)$$

Dónde

P_i : P disponible determinado en el muestreo del productor o en el mapa interpolado

NC : nivel crítico de P disponible

DE : dosis equivalente, cantidad de P (kg/ha) necesarias para incrementar en 1 ppm el P disponible en el suelo en los 20 cm superficiales después de 3 meses de la aplicación.

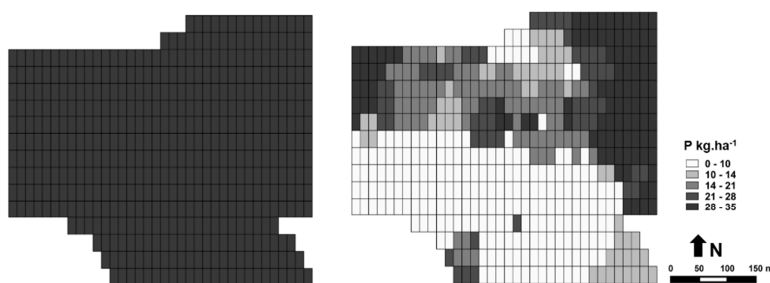


Fig. 2. Mapas de prescripción de dosis fija y variable de P con celdas rectangulares de 15 x 30 m para el sitio 3.

Las estrategias de fertilización fueron comparadas calculando el porcentaje de área sub- o sobre-fertilizada en cada lote y grilla. El área sub-fertilizada se calculó como la suma de las celdas que no deberían ser fertilizadas según el muestreo del productor y necesitan ser fertilizadas según el mapa de P interpolado obtenido a partir de las grillas y fue expresada en porcentaje del área total del lote. Mientras que el área sobre-fertilizada se calculó como la suma de las celdas que deberían ser fertilizadas según el muestreo del productor y no necesitan ser fertilizadas según el mapa de P interpolado obtenido a partir de las grillas y fue expresada en porcentaje del área total del lote. Las prescripciones en dosis fija y sitio-específica fueron comparadas considerando la cantidad total de P requerido (kg) y el costo por sitio y grilla, utilizando un precio del fertilizante de 0,65 US\$/kg.

3 Resultados

Los valores de P disponible mostraron alta variabilidad en todos los sitios evaluados, en especial en el sitio 3. El valor medio de P fue 18, 24 y 44% superior a la mediana en los sitios 1, 2 y 3, respectivamente. En todos los casos se observaron distribuciones sesgadas, con un rango muy amplio y extendido por valores máximos elevados. Los datos presentaron en todos los casos distribuciones no-normales, que se normalizaron por transformación logaritmo natural, excepto en el sitio 3 (Tabla 1).

Los valores obtenidos en el muestreo del productor fueron 37,4, 24,2 y 9,9 ppm de P disponible, en los sitios 1, 2 y 3, respectivamente, y difirieron notablemente de los valores medios determinados en las grillas de datos. El sitio 3 fue el único en el cual se determinó un valor de P inferior al nivel crítico para el muestreo del productor. En cambio los valores medios de las grillas resultaron inferiores al crítico en los sitios 2 y 3, y la mediana fue inferior al crítico en todos los casos. El 44, 66 y 78% del total de datos evaluados en las grillas fueron inferiores al nivel crítico en los sitios 1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de los datos de P obtenidos en los muestreos en grillas.

Sitio	Media (ppm)	Mediana (ppm)	CV (%)	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Kurtosis	Sesgo	W(Pr) [†]
1	22,35	18,90	46,20	7,10	47,45	0,72	1,14	0,87 (**)
2	18,91	15,26	56,68	5,95	45,63	0,55	1,27	0,81 (*)
3	17,97	12,49	76,53	5,85	70,31	4,84	2,08	0,76 (**)

[†]Resultado del test de Shapiro y Wilks *p<0.05; ** p<0.0001

El procedimiento de optimización aplicado para el mapeo, condujo a la selección de diferentes modelos de semivariograma. El grado de dependencia espacial del P fue fuerte en el sitio 1 y moderado en los sitios 2 y 3 (Tabla 2). En todos los casos el número de vecinos optimizado en el proceso de interpolación fue de cuatro, en un radio de entorno de 100 m.

Tabla 2. Modelo de semivariograma y parámetros ajustados en la interpolación de los datos de las grillas a 60 x 60 m.

Sitio	Modelo semivariograma	Rango (m)	Pepita/meseta	r ²
1	Gaussiano	108	0.001	0.99
2	Esférico	212	0.29	0.93
3	Lineal	263	0.48	0.73

La ventaja de los mapas para representar la variabilidad espacial en la distribución del P disponible fue evaluada mediante la EP. Si bien la EP fue variable entre sitios, en todos los casos los mapas interpolados fueron más adecuados para representar la distribución espacial del P que la media de los datos de la grilla (EPg), y más aún respecto al muestreo del productor (EPp) (Figura 3). Dado que el valor medio de la

grilla no se conoce a priori, la comparación respecto al valor del muestreo del productor muestra una clara ventaja del mapa interpolado para representar la variabilidad espacial en la distribución del P.

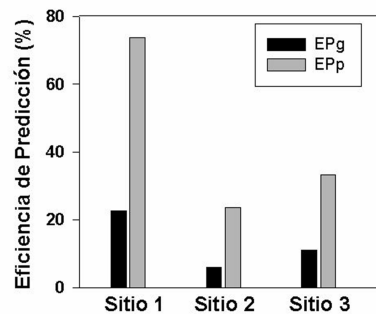


Fig. 3. Calidad de los mapas interpolados según eficiencia de predicción calculada utilizando la media de los datos de la grilla (EPg) o el valor obtenido en el muestreo del productor (EPp).

Los valores de P disponible obtenidos en el muestreo tradicional del productor fueron superiores al nivel crítico en los sitios 1 y 2, por lo cual no se recomendó fertilización. Mientras que, en el sitio 3 el valor fue inferior al nivel crítico y la dosis de fertilización recomendada fue de 30 kg P ha⁻¹. Las diferencias entre el manejo uniforme y sitio específico, como porcentaje del área total sub- o sobre-fertilizada, muestran valores negativos y positivos, respectivamente (Figura 4). En los sitios 1 y 2, donde el porcentaje de área sub-fertilizada fue elevado (44 y 66%), la cantidad total de fertilizante prescrito fue baja, debido a que los valores de P fueron levemente inferiores al umbral. En el sitio 3, el manejo uniforme determinó un 38% del área sobre-fertilizada. La cantidad adicional de P prescrito en la dosis fija respecto a la variable, fue de 400 kg, lo que representa un costo adicional de 10 dólares ha⁻¹.

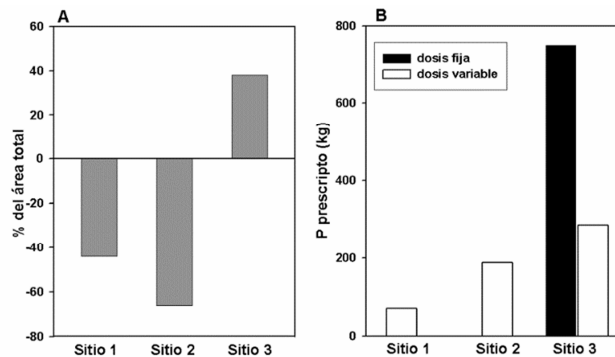


Fig. 4. Áreas sub y sobre-fertilizadas por sitio (A) y cantidad de P prescrito según dosis fija del manejo uniforme y dosis variable del manejo sitio específico (B)

4 Discusión

La adopción de la agricultura de precisión en Argentina comenzó, como en los países desarrollados, en los '90 [20] y mientras que la venta de equipos, como autoguía, banderillero satelital, monitores de siembra y cosecha han crecido sostenidamente desde entonces [3], el manejo sitio-específico de nutrientes aún no está difundido [4].

La agriculturización en combinación con las bajas dosis de fertilizante fosforado aplicado han disminuido el contenido de fósforo en los suelos de la región pampeana [14], [21]. Sin embargo, nuestros resultados ponen de manifiesto que los sitios evaluados estuvieron más caracterizados por una alta variabilidad en la disponibilidad de P que por bajos niveles de P. Probablemente el paisaje ondulado con suelos erosionados y la aplicación bandeada de fertilizantes en manejos continuos en siembra directa pueden explicar la elevada variabilidad espacial observada, como fue sugerido por [22].

La adecuada calidad de los mapas es un requisito mencionado como necesario para el manejo sitio específico, pero escasamente reportado [7]. La eficiencia de predicción calculada comparando el mapa interpolado respecto al valor del muestreo realizado por el productor propuesta en este trabajo pone de manifiesto claramente el beneficio del mapeo para representar la variabilidad espacial. El valor medio de la grilla es un valor cercano a la media poblacional, menos influenciado por valores extremos que el muestreo que realiza el productor, y pocas veces disponible. Los resultados muestran que la variabilidad de los valores de P respecto al nivel crítico y la EP afectan la prescripción de fertilización y el beneficio económico. No obstante, la EP resulta poco relevante cuando los valores determinados en el muestreo del productor superan el nivel crítico.

La prescripción sitio-específica de P permitió un ahorro del 50% respecto a la dosis fija en un sitio. Este ahorro es mayor al reportado por [23] y [24] y contribuiría a reducir el impacto ambiental de pérdidas de P en el agua de escurrimiento en ambientes ondulados como los nuestros. El ahorro calculado representa una reducción en el gasto de fertilizantes de 10 US\$ por ha, similar al reportado en por [2] en N. Considerando los costos adicionales de la aplicación variable, el muestreo de suelo y los análisis de suelo, la ganancia final es nula. En nuestra región, el alto costo de los análisis de suelo limita la adopción de muestreos intensivos de suelos, salvo que la recomendación puede utilizarse para una secuencia de varios cultivos.

Este estudio se realizó en una región caracterizada por un paisaje ondulado con alta variabilidad en tipos de suelos, estudios adicionales en otras regiones de la pampa argentina deberían conducirse para generalizar las recomendaciones respecto al manejo sitio-específico del P.

5 Conclusiones

El uso del valor de P disponible obtenido por el muestreo del productor en lugar del valor promedio de la grilla de datos para calcular la eficiencia de predicción mues-

tra más claramente la ventaja del mapeo para representar la variabilidad espacial en la distribución del P.

La variabilidad de los valores de P disponible respecto al nivel crítico y la EP afectaron la recomendación de fertilización y el resultado económica. La eficiencia de predicción fue irrelevante cuando los valores obtenidos en el muestreo de suelo del productor fueron superiores al nivel crítico y no se recomendó fertilizar. La prescripción sitio-específica evidenció una mejor performance que la dosis fija en todos los casos mapeados, mostrando áreas sub- y sobre-fertilizadas con el muestreo del productor.

6 Referencias

1. Sawyer, J.E.: Concepts of variable rate technology with considerations for fertilizer applications. *J. Prod. Agric.* 7 (2): 163-201 (1994)
2. Bongiovanni, R. and J. Lowenberg-Deboer 2004. Precision agriculture and sustainability. *Prec Agric* 5: 359-387.
3. Méndez, A., Vélez, J., Villarroel, D., and Scaramuzza, F.: Evolución de la Agricultura de Precisión en Argentina en los últimos 15 años. In 13º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Expo de Máquinas Precisas, Córdoba-Argentina. (2013)
4. Melchiori, R., Albarenque, S., and Kemerer, A.: Uso, adopción y limitaciones de la agricultura de precisión en Argentina. In 12º. Curso Internacional de Agricultura de Precisión y Expo de Máquinas Precisas, Córdoba-Argentina (2012).
5. Kravchenko, A.N. and D.G. Bullock.: A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agron. J.* 91:393- 400 (1999)
6. Chang, J., D.E. Clay, C.G. Carlons, and D. Malo.: Precision farming protocols: Grid distance and soil nutrient impact on the reproducibility of spatial variability measurements. *Prec. Agric.* 1: 277-289 (1999)
7. Mueller, T.G., Pierce, F.J., Shanbenberger, O., and Warcke, D.D.: Map quality for site-specific management. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1547-1558 (2001)
8. Mueller, T.G.: Assessing map quality for site-specific fertility management. Chapter 6. In: F.J. Pierce and D.E. Clay (Ed.). *GIS Applications for Agriculture*. (pp. 103-120). CRC Press, Boca Raton, Fla (2007)
9. Agterberg, F.P.: Trend surface analysis. In: G.L. Gaile and C.J. Willmott (Ed.) *Spatial statistics and models*. Reidel, Dordrecht, the Netherlands (1984)
10. Mueller, T.G., Dhanikonda, S.R.K., Pusuluri, N.B., Karathanasis, A.D., Mathias, K.K., Mijatovic, B. and Sears, B.G.: Optimizing inverse distance weighted interpolation with cross-validation. *Soil Science*, 170(7), 504-515 (2005)
11. Kravchenko, A.N.: Influence of the spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society America Journal*, 67, 1564-1571 (2003)
12. Darwich, N.: Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. *Informativo de Investigaciones Agrícolas*, 1-5, 401-412 (1983)

13. Montoya, J., Bono, A., Suárez, A., Darwich, N., and Babinec, F.: Cambios en el contenido de fósforo asimilable en los suelos del este de la provincia de La Pampa, Argentina. *Revista Ciencia del Suelo*, 17, 45-48 (1999)
14. Sainz Rosas, H., Echeverría, H., Angelini, H.: Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra Pampeana argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38(1), 33-39 (2011)
15. van Barneveld, G.W.: Los suelos de la Estación Experimental INTA Paraná. Memoria técnica, mapa de suelos y mapa de capacidad de uso de las tierras. Mapa de Suelos Provincia de Entre Ríos. Proyecto PNUD/FAO/INTA ARG/68/526 (mimeografiado), 84 pp (1972)
16. Bray, R.H., Kurtz, L.T.: Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59(1), 39-46(1945).
17. Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., and Robledo, C.W.: InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina(2008)
18. Robertson, G.P.: GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan, USA (2008)
19. Cambardella, C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F.Turco, and A.E. Konopka.: Field scale variability in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511 (1994)
20. Bullock, D.S., Lowenberg-Deboer, J., Swinton, S.M.: Adding value to spatially managed inputs by understanding site-specific yield response. *Agricultural Economics*, 27, 233-245 (2002)
21. García, F., and González Sanjuan, M.F.: Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? IPNI. *Informaciones Agronómicas del ConoSur*, 48, 1-5 (2010)
22. Kitchen, N.R., D.G. Westfall, and J.L. Havlin.: Soil Sampling under No-Till Banded Phosphorus. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 54(6): 1661-1665 (1990)
23. Wittry, D.J. and Mallarino, A.P.: Comparison of uniform- and variable-rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Agronomy Journal*, 96, 26-33 (2004)
24. Bermudez, M., and Mallarino, A.P.: Impacts of variable-rate phosphorus fertilization based on dense grid soil sampling on soil-test phosphorus and grain yield of corn and soybean. *Agronomy Journal*, 99,822–832 (2007)